

9. Altintas, Y., & Weck, M. (2004) Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 53 (2), 619–642.

10. Kudinov, V. A. (1967) *Dynamics of Machine Tools*. Moscow, Mashinostroenie. 359 p. (in Russian).

11. Kalveram, M., Insperger, T., Weinert, K., Stépán, G., Govekar, E., & Grabec, I. (2005) Stability Prediction for Mil-

ling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (7–8), 769–781. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.015.

12. Kunets, G. (2004) High-Speed Machining and Conventional Technological Basis: Incompatibility Management. *Mir Tekhniki i Tekhnologiy* [World of Technique and Technology], 6, 35–37 (in Russian).

Поступила 17.11.2014

УДК 621.941.1

## УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ТОЧЕНИИ С АСИММЕТРИЧНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ ИНСТРУМЕНТА

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ШЕЛЕГ В. К.,  
канд. техн. наук, доц. МОЛОЧКО В. И., инж. ДАНИЛЬЧИК С. С.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: sdanilchik@mail.ru

Рассмотрен процесс точения конструкционных сталей с асимметричными колебаниями инструмента, направленными вдоль подачи. Асимметричные колебания, характеризующиеся коэффициентом асимметрии цикла колебаний, их частотой и амплитудой, дополнительно сообщаются инструменту в процессе токарной обработки с целью дробления стружки. Определены условия устойчивого стружкодробления и получения оптимальных размеров элементов стружки. С целью уменьшения негативного влияния амплитуды колебаний на процесс резания и качество обработанных поверхностей обработку следует проводить с минимальной ее величиной. В этом случае обеспечивается определенное отношение частоты колебаний инструмента к частоте вращения заготовки. Получена формула для расчета этого отношения, учитывающая предполагаемую длину элементов стружки и коэффициент асимметрии цикла колебаний.

Установлено влияние коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента на шероховатость обработанных поверхностей и износ режущего инструмента. По результатам обработки деталей из сталей 45 и ШХ15 получены математические зависимости шероховатости обработанных поверхностей от режимов резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента. Из всех режимов резания наиболее значимое влияние на величину шероховатости оказывает подача инструмента, с увеличением которой растет и шероховатость. Снижению шероховатости поверхности способствует уменьшение коэффициента асимметрии цикла колебаний. Однако при этом износ режущего инструмента происходит более интенсивно. Для уменьшения износа коэффициент асимметрии цикла колебаний режущего инструмента следует увеличивать, поэтому выбор этого коэффициента основывается на параметрах шероховатости поверхности, которые необходимо получить после обработки, и интенсивности износа инструмента.

**Ключевые слова:** стружкодробление, асимметричные колебания, коэффициент асимметрии, точность, шероховатость.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

## CONDITIONS FOR STABLE CHIP BREAKING AND PROVISION OF MACHINED SURFACE QUALITY WHILE TURNING WITH ASYMMETRIC TOOL VIBRATIONS

SHELEG V. K., MOLOCHKO V. I., DANILCHYK S. S.

Belarusian National Technical University

The paper considers a process of turning structural steel with asymmetric tool vibrations directed along feeding. Asymmetric vibrations characterized by asymmetry coefficient of vibration cycle, their frequency and amplitude are additionally transferred to the tool in the turning process with the purpose to crush chips. Conditions of stable chip breaking and obtaining optimum dimensions of chip elements have been determined in the paper. In order to reduce a negative impact of the vibration amplitude on a cutting process and quality of the machined surfaces machining must be carried out with its minimum value. In this case certain ratio of the tool vibration frequency to the work-piece rotation speed has been ensured in the paper. A formula has been obtained for calculation of this ratio with due account of the expected length of chip elements and coefficient of vibration cycle asymmetry.

Influence of the asymmetric coefficient of the tool vibration cycle on roughness of the machined surfaces and cutting tool wear has been determined in the paper. According to the results pertaining to machining of work-pieces made of 45 and

316X15 steel the paper presents mathematical relationships of machined surface roughness with cutting modes and asymmetry coefficient of tool vibration cycle. Tool feeding being one of the cutting modes exerts the most significant impact on the roughness value and increase of the tool feeding entails increase in roughness. Reduction in coefficient of vibration cycle asymmetry contributes to surface roughness reduction. However, the cutting tool wear occurs more intensive. Coefficient of the vibration cycle asymmetry must be increased in order to reduce wear rate. Therefore, the choice of the coefficient of the vibration cycle asymmetry is based on the parameters of surface roughness which must be obtained after machining and intensity of tool wear rate.

**Keywords:** chip breaking, asymmetric vibrations, coefficient of asymmetry, precision, roughness.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 12 titles.

Известные методы дробления стружки в процессе обработки деталей на станках подразделяются на две группы: с постоянными и переменными параметрами процесса резания [1]. Резание с постоянными параметрами обеспечивает дробление стружки за счет регулирования режимов резания, подбора геометрических параметров режущего инструмента и использования дополнительных устройств, осуществляющих механическое разделение полученной стружки (стружколомы, экраны, лунки, упоры и т. д.), тепловое (расплавление стружки или ее пережог) или другое воздействие на стружку [2–4]. Эти методы в своем большинстве отличаются невысокой стоимостью, простотой реализации, неприхотливостью в процессе работы. Однако их эффективность ограничена узкими диапазонами режимов резания. Каждая переналадка оборудования для выполнения нового технологического процесса требует длительной предварительной работы по подбору оптимальных режимов резания, геометрии режущего инструмента, параметров устройства для дробления стружки. Расширяется номенклатура режущих инструментов, что усложняет организацию инструментального хозяйства.

Дробление стружки с переменными параметрами осуществляется за счет мгновенного прекращения процесса резания [1]. К таким методам относится дискретное, релаксационное и вибрационное резание [3, 5–8]. Методы дискретного и релаксационного резания применимы для обработки заготовок диаметром не более 170 мм. Кроме того, периодический разгон и торможение в процессе обработки осуществляются рабочим органом станка, имеющим большую массу и силы инерции, что может привести к преждевременному выходу станка из строя. Методы стружкодробления с переменными параметрами процесса резания обеспечивают устойчивое дробление стружки в широком диапазоне режимов резания, но при этом снижается качество обработанных поверхностей. Поэтому с целью обеспечения управляемого стружкодробления при токарной обработке и необхо-

димых точности и шероховатости обработанных поверхностей авторами был использован метод точения с асимметричными колебаниями инструмента, направленными вдоль подачи [9]. Точение с асимметричными колебаниями инструмента заключается в том, что на подачу инструмента накладываются дополнительные негармонические колебания с частотой  $f$  и амплитудой  $A$ , цикл которых характеризуется коэффициентом асимметрии

$$\xi = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – части оборота заготовки, соответствующие прямому (врезание) и обратному (отвод) ходу инструмента.

Развертка поверхности диаметром  $d$ , на которой ломаными линиями 0–5 и 5'–10 показаны траектории движения резца на двух последовательных оборотах заготовки с подачей  $S_0$  и амплитудой колебаний  $A$ , представлена на рис. 1. Колебания инструмента обеспечивают периодическое изменение расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки от минимального до максимального значения  $\Delta_{\max}$ , а затем снова до минимального, при котором происходит перерезание или переламывание стружки. Точение с асимметричными колебаниями инструмента целесообразно проводить на минимальной амплитуде колебаний, что позволяет получить наилучшие параметры обработки по величине гребешков шероховатости и максимальной силе сопротивления резанию. Установлено, что наименьшая амплитуда колебаний  $A$ , необходимая для достижения эффекта дробления стружки, будет тогда, когда отношение частоты колебаний инструмента  $f$  к частоте вращения заготовки  $n$  подчиняется равенству

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1}, \quad (2)$$

где  $z$  – число полных циклов колебаний инструмента за один оборот заготовки, которое

выбирают в зависимости от предполагаемой длины элементов стружки;  $\xi$  – коэффициент асимметрии цикла колебаний.

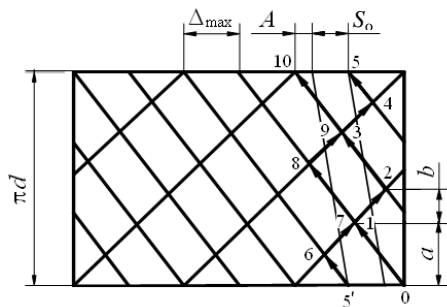


Рис. 1. Траектория движения инструмента при точении с асимметричными колебаниями

При других значениях отношения для обеспечения дробления стружки необходимо увеличивать амплитуду колебаний. Для точения с минимальной амплитудой инструменту сообщают колебания с периодами врезания  $a$  и отвода  $b$ , равными:

$$a = \frac{\xi}{z(\xi + 1) + 1}; \quad b = \frac{1}{z(\xi + 1) + 1}. \quad (3)$$

При этом, как показано на рис. 1, касание траекторий инструмента на двух последовательных оборотах заготовки происходит по вершинам 1 и 7, 3 и 9 и т. д.

Поскольку элементы стружки формируются и отрезаются за один цикл колебательного движения инструмента, их длину  $l_{\text{стр}}$  при обработке заготовки диаметром  $d$  можно рассчитать по формуле

$$l_{\text{стр}} = \frac{c\pi d}{K_l}, \quad (4)$$

где  $c$  – часть оборота заготовки, приходящаяся на цикл колебаний инструмента;  $K_l$  – коэффициент продольной усадки стружки.

Число циклов колебаний инструмента за один оборот заготовки является величиной, обратной величине цикла колебаний  $c$ . Поэтому в зависимости от требуемой ориентировочной длины элементов стружки  $l_{\text{стр}}$  число полных циклов колебаний  $z$  может быть найдено с последующим округлением до целого значения

$$z = \frac{\pi d}{l_{\text{стр}} K_l}. \quad (5)$$

Это значение будет использоваться для расчета частоты колебаний инструмента  $f$ .

При расчете числа полных циклов колебаний следует исходить из того, что оптимальной считается стружка в виде элементов длиной 30–150 мм [10].

Влияние асимметрии цикла колебаний инструмента на толщину стружки заключается в том, что при изменении коэффициента асимметрии  $\xi$  изменяется максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки  $\Delta_{\text{max}}$ , которое может быть определено из формул:

$$\Delta_{\text{max}} = S_o \left( 1 + \frac{1}{\xi} \right) \text{ при } \xi > 1;$$

$$\Delta_{\text{max}} = S_o (1 + \xi) \text{ при } \xi < 1.$$

С уменьшением расстояния  $\Delta_{\text{max}}$  будет уменьшаться толщина стружки. Следовательно, можно предположить, что уменьшится и шероховатость обработанных поверхностей.

Экспериментальные исследования стружкодробления и параметров точности и качества обработанных поверхностей проводили в процессе точения и контроля образцов из сталей 45 и ШХ15, которые широко применяются в производстве. В качестве режущего инструмента использовали резец из твердого сплава Т15К6 с углами в плане  $\phi = 45^\circ$  и  $\phi_1 = 45^\circ$ , передним углом  $\gamma = 15^\circ$ , задним углом  $\alpha = 15^\circ$  и углом наклона главной режущей кромки  $\lambda = 7^\circ$ . Инструменту сообщали колебательные движения с коэффициентами асимметрии цикла колебаний 1/4; 1/3; 1/2; 1; 2; 3 и 4. Ограничились данными коэффициентами в связи с тем, что уменьшение коэффициента менее 1/4 и увеличение более 4 не приводят к заметному уменьшению максимальной толщины среза. Так, увеличение коэффициента асимметрии до 5 или уменьшение до 1/5 позволяет уменьшить толщину среза лишь на 4 %. Эксперимент проводили на режимах резания, характерных для полустивовой и чистовой обработки: глубина резания – 1–3 мм; подача – 0,075–0,300 мм/об, скорость резания – 40–180 м/мин, при обработке на которых по традиционной схеме резания образовывалась сливная стружка. Стружка, образующаяся при традиционном точении стали ШХ15 со скоростью резания 118 м/мин, глубиной резания 1,5 мм и подачей инструмента 0,15 мм/об, показана на рис. 2а, а образцы стружки, полученные в процессе точения на тех же режимах резания с минимальной амплитудой колебаний инструмента 0,081 мм при

коэффициенте асимметрии цикла колебаний  $\xi = 1/2$ , на рис. 2б. Эти элементы стружки имеют схожие форму и размеры и образуются за каждый цикл колебаний инструмента, что характеризует процесс стружкодробления как устойчивый.

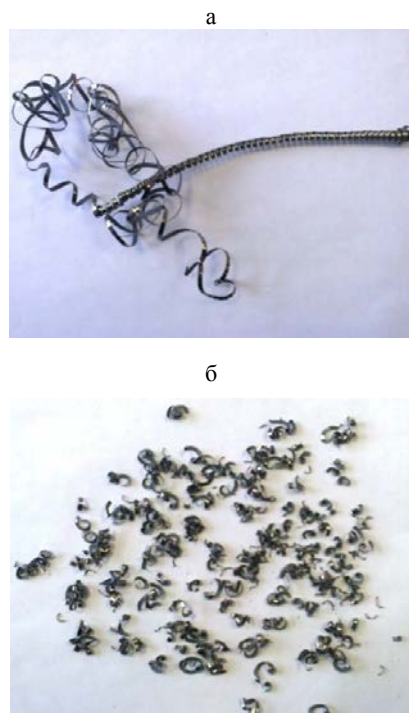


Рис. 2. Образцы стружки, полученные при точении стали 30X15

Известно, что теоретическая минимальная амплитуда равна половине подачи на оборот [8]. Но действительная минимальная амплитуда больше теоретической. К примеру, при обработке с подачей  $S_0 = 0,075\text{--}0,300$  мм/об, скоростью резания  $v = 70$  м/мин и глубиной резания  $t = 1,5$  мм средние значения минимальной амплитуды, рассчитанные для различных коэффициентов асимметрии, на 5–50 % больше теоретических. Более высокие ее значения в сравнении с теоретической минимальной амплитудой связаны с упругими деформациями системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ), которые увеличиваются с ростом сил резания.

Силы резания при точении с асимметричными колебаниями инструмента имеют неустойчивый характер, изменяясь до максимальных значений в процессе срезания стружки максимальной толщины и минимальных в момент отделения элемента стружки. Как видно из рис. 3, максимальные силы резания  $P_{z\max}$  воз-

растают с увеличением амплитуды колебания инструмента, так как повышается максимальная толщина среза. При обработке с колебаниями инструмента максимальные значения сил резания превышают силы резания, характерные для обычного точения. Так, при точении с глубиной резания 1,5 мм, подачей 0,15 мм/об (амплитуда 0,075 мм) и скоростью резания 90 м/мин сила резания  $P_z$  увеличивается в зависимости от коэффициента асимметрии цикла колебаний на 35–75 %. Однако средние значения силы резания при точении с минимальной амплитудой колебаний инструмента, как установлено экспериментальными исследованиями, сопоставимы с силами резания при обычном точении.

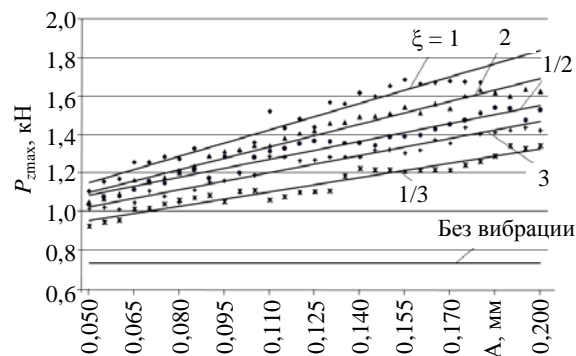


Рис. 3. Зависимость силы резания  $P_{z\max}$  от амплитуды колебаний инструмента  $A$ :  $v = 90$  м/мин;  $S_0 = 0,15$  мм/об;  $t = 1,5$  мм

Периодические изменения толщины среза и сил резания при точении с асимметричными колебаниями инструмента сказываются на величине шероховатости обработанных поверхностей. Для определения степени влияния на шероховатость обработанных поверхностей режимов резания реализован план полного факторного эксперимента. Регрессионную модель этого влияния, к примеру для коэффициента асимметрии 1/4, получили в виде

$$Ra = 1,04835 + 6,22759S_0 + 0,4899t + 0,00392v.$$

Регрессионные модели, полученные для других коэффициентов асимметрии цикла колебаний инструмента, в том числе и по результатам обработки деталей из стали 30X15, позволяют утверждать, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает подача инструмента. Шероховатость поверхностей, обработанных с наложением на подачу инструмента колебаний с разными коэффициентами асимметрии цикла, имеет различные значения (рис. 4).

Зависимость шероховатости поверхности от коэффициента асимметрии носит нелинейный характер. Используя методику расчета, приведенную в [11], получили уравнения зависимости шероховатости от коэффициента асимметрии цикла для различных подач, в том числе для подачи  $S_0 = 0,15$  мм/об оно имеет вид

$$Ra = 2,9194 + 1,2882\xi - 0,2528\xi^2.$$

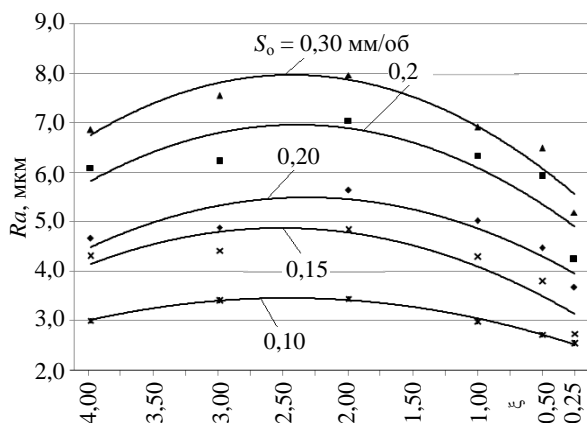


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента:  $v = 70$  м/мин;  $t = 1,5$  мм

Результаты исследования свидетельствуют о том, что шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, может быть уменьшена по сравнению с шероховатостью поверхности, полученной после вибрационного точения с гармоническими колебаниями ( $\xi = 1$ ). Так, при точении с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/4$  шероховатость уменьшается на 25–30 %. При определенных режимах резания точение с коэффициентами асимметрии  $\xi < 1$  позволяет получать шероховатость поверхности, соответствующую чистовой обработке ( $Ra = 2,5\text{--}3,2$  мкм).

Оценку влияния колебаний инструмента на точность обработки проводили по результатам контроля точности диаметральных размеров, отклонения от круглости и профиля продольного сечения. Статистический анализ полученных диаметральных размеров позволяет утверждать, что распределение контролируемых параметров подчиняется закону Гаусса. Зависимость величины отклонения размеров и формы обработанных поверхностей от коэффициента асимметрии цикла колебаний инструмента не прослеживается. Величина отклонений сопо-

ставима с отклонениями при обычном точении и определяется главным образом жесткостью технологической системы СПИЗ. Точность обработки точением с наложением асимметричных колебаний инструмента может достигать 9–10 квалитетов точности, что соответствует получистовой и чистовой обработке на токарных станках.

Представляет интерес то, как колебания и коэффициент асимметрии цикла колебаний влияют на износ инструмента. Для обеспечения точности при чистовой обработке решающее значение имеет размерный износ. Интенсивность размерного износа принято оценивать величиной линейного относительного износа [12]. Значения линейного относительного износа резца при точении стали ШХ15 на режимах резания ( $v = 96$  м/мин;  $S_0 = 0,15$  мм/об;  $t = 1,5$  мм) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Линейный относительный износ инструмента

Вид токарной обработки	Износ инструмента, мкм			
	Обычное точение	Вибрационное точение	Точение с коэффициентом асимметрии цикла колебаний	
			1/4	4
Линейный относительный износ инструмента	9,6	8,5	8,3	8,0

Исследования показали, что в процессе точения с асимметричными колебаниями в используемых диапазонах режимов резания линейный относительный износ уменьшается на 10–15 % по сравнению с обычным точением, что связано с периодическим прекращением процесса резания, снижением температуры инструмента и его адгезионного и диффузионного износа. При этом износ инструмента уменьшается с увеличением коэффициента асимметрии цикла колебаний.

## ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения устойчивого стружкодробления в процессе точения с асимметричными колебаниями инструменту необходимо сообщить частоту колебаний  $f$ , при которой выполняется равенство (2). При этом периоды врезания инструмента  $a$  и отвода  $b$  в цикле колебаний должны определяться по формуле (3).

2. Выбор коэффициента асимметрии цикла колебаний режущего инструмента основывается на параметрах шероховатости поверхности, которые необходимо получить, и интенсивности износа инструмента. В связи с этим для чистовой и получистовой обработки с шероховатостью поверхности  $Ra < 5$  мкм рекомендуется использовать колебания инструмента с коэффициентом асимметрии  $\xi = 1/4$ . При использовании колебаний с  $\xi > 1/4$  для получения данной шероховатости следует уменьшать подачу инструмента, что приведет к потере производительности.

Для точения с получением шероховатости поверхности  $Ra = 6,3$  мкм наиболее оптимальным коэффициентом асимметрии цикла колебаний инструмента является  $\xi = 1/3$ . Черновое точение, или точение деталей, шероховатость обработанных поверхностей которых составляет более 6,3 мкм, следует производить с коэффициентом асимметрии цикла колебаний  $\xi = 4$ . Точение с данным коэффициентом асимметрии обеспечивает наименьший износ инструмента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметшин, Н. И. Вибрационное резание металлов / Н. И. Ахметшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родиков; под ред. К. М. Рагульскаса. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 80 с.
2. Ильин, В. С. Способы завивания и дробления стружки при работе на токарных станках с программным управлением: технологические рекомендации / В. С. Ильин, А. С. Кондратов, Б. Н. Бубнов; Науч.-исслед. ин-т технологии и орг. пр-ва. – М.: НИИТ, 1975. – 24 с.
3. Захаров, Ю. Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю. Е. Захаров, В. Т. Гарбузюк. – Тула: Приокское книжное изд-во, 1970. – 112 с.
4. Способы завивания и дробления сливной стружки и области их применения: руководящие материалы. – М.: Всесоюз. науч.-исслед. ин-т информ. по машиностроению, 1970. – 38 с.
5. Мансырев, И. Г. Методы дробления сливной стружки в процессе резания / И. Г. Мансырев, А. А. Смирнов, И. И. Козарь. – Л.: ЛДНТП, 1983. – 20 с.
6. Богословский, Н. В. Кинематическое дробление стружки при точении труднообрабатываемых сталей / Н. В. Богословский, Т. И. Иващенко // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: материалы краткосроч. науч.-техн. семинара, Ленинград, 13–14 мая / под ред. Ю. М. Зубарева. – Л.: Знание, 1991. – С. 47–48.
7. Коновалов, Е. Г. Осциллирующее точение / Е. Г. Коновалов, А. В. Борисенко. – Минск: Изд-во АН БССР, 1960. – 32 с.
8. Подураев, В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.

9. Данильчик, С. С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С. С. Данильчик, В. К. Шелег // Наука и техника. – 2013. – № 4. – С. 16–21.
10. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
11. Кацев, П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
12. Макаров, А. Д. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов: учеб. пособие / А. Д. Макаров, В. С. Мухин, Л. Ш. Шустер. – Уфа: Уфимский авиацион. ин-т, 1974. – 372 с.

#### REFERENCES

1. Akhmetshin, N. I., Gots, E. M., Rodikov, N. F., & Ragulskis, K. M. (1987) *Vibratory Cutting of Metals*. Leningrad, Mashinostroenie, Leningrad Branch. 80 p. (in Russian).
2. Ilyin, V. S., Kondratov, A. S., & Bubnov, B. N. (1975) *Methods for Curling and Breaking Chips While Using Software-Controlled Turning Machines: Technological Recommendations*. Moscow: Scientific-Research Institute of Technology and Production Engineering (NIAT). 24 p. (in Russian).
3. Zakharov, Yu. E., & Garbuziuk, V. T. (1970) *Useful Vibrations in Mechanical Engineering*. Tula, Priokskoe Publishing House. 112 p. (in Russian).
4. *Methods for Curling and Breaking Flow Chips and Fields of Their Application. Instructive Materials* (1970). Moscow, All-Union Scientific-Research Institute of Information on Mechanical Engineering. 38 p. (in Russian).
5. Mansyrev, I. G., Smirnov, A. A., & Kozar, I. I. (1983) *Methods for Crushing Flow Chips During Cutting Process*. Leningrad, Leningrad House of Scientific-Research Promotion [LDNTP]. 20 p. (in Russian).
6. Bogoslovsky, N. V., & Ivashchenko, T. I. (1991) *Kinematic Chip Breaking While Turning Hard-To-Machine Steel*. Zubarev, Yu. M. (ed.). *Ways to Improve Efficiency of Material Machining While Using Cutting in Mechanical Engineering. Proceedings of Short-Term Scientific and Technical on May 13–14*. Leningrad, Znanie, 47–48 (in Russian).
7. Kononov, E. G., & Borisenko, A. V. (1960) *Oscillating Turning*. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the Belorussian SSR. 32 p. (in Russian).
8. Poduraev, V. N. (1970) *Cutting with Vibrations*. Moscow, Mashinostroenie. 350 p. (in Russian).
9. Danilchik, S. S., & Sheleg, V. K. (2013) *Turning Kinematics with Imposition of Asymmetric Tool Vibrations*. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 4, 16–21 (in Russian).
10. Vulf, A. M. (1973) *Metal Cutting*. 2<sup>nd</sup> Edition. Leningrad, Mashinostroenie. 496 p. (in Russian).
11. Katsev, P. G. (1968) *Statistical Methods for Investigating Cutting Tool*. Moscow, Mashinostroenie. 156 p. (in Russian).
12. Makarov, A. D., Mukhin, V. S., & Shuster, L. Sh. (1974) *Tool Wear, Quality and Durability of Parts Made of Aircraft Materials*. Ufa: Ufa Aviation Institute. 372 p. (in Russian).

Поступила 03.03.2015